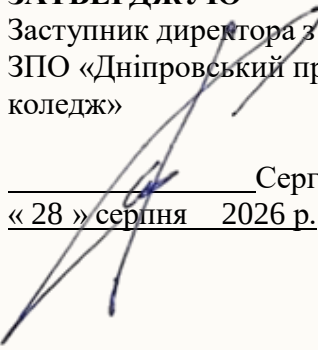


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗПО ДНІПРОВСЬКИЙ ПРОФЕСІЙНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОЛЕДЖ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з навчально-методичної роботи
ЗПО «Дніпровський професійний технологічний
коледж»


« 28 » серпня 2026 р.

Сергій ГОРДІЄНКО



КОНСПЕКТ
З ДИСЦИПЛІНИ «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА З
ОСНОВАМИ
ЕЛЕКТРОНІКИ»

МОДУЛЬ 1. Електричні та магнітні кола. Трансформатори
верстатного обладнання

Тема 1. Електричні кола постійного струму. Закони Ома та
Кірхгофа

Розроблено для здобувачів освіти
освітнього ступеня «Фаховий молодший бакалавр»
спеціальності G9 «Прикладна механіка»

Викладач: Володимир ПУСТОВОЙТ

Вступ

Сучасне верстатне обладнання, автоматизовані лінії та роботизовані комплекси неможливо уявити без складних електричних та електронних систем. Для фахівців у галузі прикладної механіки глибоке розуміння фізичних процесів, що протікають в електричних колах, є фундаментальною базою для успішного проектування, експлуатації та діагностики сучасних мехатронних систем та верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК).

Цей теоретичний матеріал присвячений вивченню основних понять і законів кіл постійного струму. Знання базових законів (Ома, Кірхгофа, Джоуля-Ленца) є необхідними для подальшого вивчення складних систем електроприводу, трансформаторів та електронних перетворювачів, які широко застосовуються у промисловому обладнанні.

1. Електричне поле, потенціал та напруга

1.1. Електричне поле

Будь-який електричний заряд створює навколо себе матеріальне середовище, яке називається **електричним полем**. Електричне поле є особливою формою матерії, через яку здійснюється взаємодія між електрично зарядженими частинками або макроскопічними тілами.

Основною силовою характеристикою електричного поля є **напруженість E** . Напруженість електричного поля в даній точці дорівнює відношенню сили **F** , з якою поле діє на точковий позитивний заряд **q** , внесений у цю точку, до величини цього заряду:

$$E = F / q$$

Одиницею вимірювання напруженості в системі СІ є вольт на метр (**V/m**). Напруженість є векторною величиною. Напрямок вектора **E** збігається з напрямком сили, що діє на позитивний заряд. Графічно електричне поле зображують за допомогою силових ліній (ліній напруженості). Лінії напруженості починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних. У металевих провідниках верстатного обладнання електричне поле змушує вільні електрони рухатися, утворюючи електричний струм.

1.2. Електричний потенціал та різниця потенціалів (напруга)

При переміщенні електричного заряду в електричному полі сили поля виконують роботу. Електричне поле є потенціальним, тобто робота з переміщення заряду між двома точками не залежить від траєкторії руху, а залежить лише від початкового та кінцевого положення заряду.

Енергетичною характеристикою електричного поля є **потенціал** ϕ . Потенціал даної точки поля чисельно дорівнює потенціальній енергії одиничного позитивного заряду, поміщеного в цю точку, або роботі A , яку виконують сили поля при переміщенні цього заряду з даної точки в нескінченність (де потенціал умовно приймається за нуль):

$$\phi = A / q$$

Одиниця вимірювання потенціалу — вольт (B).

Робота, яку виконує електричне поле при переміщенні заряду q з точки 1 з потенціалом ϕ_1 у точку 2 з потенціалом ϕ_2 , дорівнює:

$$A_{12} = q (\phi_1 - \phi_2)$$

Різниця потенціалів між двома точками електричного поля називається **електричною напругою** U :

$$U = \phi_1 - \phi_2 = A_{12} / q$$

Напруга U також вимірюється у вольтах (B). Напруга визначає енергію, яку витрачає джерело на переміщення одиничного позитивного заряду між двома точками електричного кола. У промисловому обладнанні найчастіше зустрічаються напруги 24 В (кола керування), 220 В та 380 В (силові кола).

2. Електричний струм. Електрорушійна сила (ЕРС)

2.1. Природа електричного струму

Електричним струмом називається впорядкований (спрямований) рух електрично заряджених частинок. У металевих провідниках (мідь, алюміній), з яких виготовляють кабелі та обмотки двигунів верстатів, такими частинками є вільні електрони. У рідких провідниках

(електролітах) струм зумовлений рухом позитивних і негативних іонів. У напівпровідниках — рухом електронів і "дірок".

За напрямок електричного струму історично прийнято напрямок руху позитивних зарядів, тобто від точки з вищим потенціалом (плюс) до точки з нижчим потенціалом (мінус). Це означає, що у металах електрони рухаються у напрямку, протилежному до загальноприйнятого напрямку струму.

Для існування електричного струму необхідні дві умови:

- Наявність вільних носіїв електричних зарядів.
- Наявність електричного поля (різниці потенціалів), яке б створювало силу, що змушує заряди рухатися в певному напрямку.

| 2.2. Сила струму та густина струму

Кількісною мірою електричного струму є **сила струму I** . Вона визначається кількістю електрики (зарядом) q , що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

Якщо за будь-які рівні проміжки часу через переріз провідника проходить однакова кількість електрики, такий струм називається **постійним**. Для постійного струму:

$$I = q / t$$

Одиницею сили струму є ампер (**A**). 1 Ампер = 1 Кулон / 1 секунду.

Для характеристики інтенсивності струму в різних перерізах провідника використовують поняття **густини струму J** . Густина струму дорівнює відношенню сили струму I до площі поперечного перерізу провідника S , перпендикулярного до напрямку струму:

$$J = I / S$$

Одиниця вимірювання — A/m^2 (у техніці часто використовують A/mm^2). Вибір правильної густини струму є критичним при проектуванні електропроводки верстатів для запобігання перегріву кабелів. Допустима густина струму для мідних проводів зазвичай становить 4...6 A/mm^2 .

| 2.3. Електрорушійна сила (ЕРС)

Для того, щоб у замкненому колі міг безперервно протікати струм, необхідно, щоб у ньому було джерело енергії, здатне підтримувати різницю потенціалів. В електричному полі позитивні заряди рухаються від більшого потенціалу до меншого. Якби діяли лише сили електричного поля, потенціали всіх точок кола швидко вирівнялися б, і струм припинився.

Тому всередині джерела струму мають діяти сили не неелектричного (неелектростатичного) походження, які переміщують позитивні заряди від меншого потенціалу до більшого, здійснюючи роботу проти сил електричного поля. Ці сили називаються **сторонніми силами**.

Фізична величина, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил A_{st} з переміщення одиничного позитивного заряду q по всьому замкненому колу, називається **електрорушійною силою (ЕРС)** джерела E :

$$E = A_{st} / q$$

ЕРС вимірюється у вольтах (**В**). Джерелами ЕРС у верстатному обладнанні можуть бути акумулятори (перетворення хімічної енергії в електричну) або генератори (перетворення механічної енергії в електричну).

Різниця між напругою та ЕРС полягає в тому, що ЕРС характеризує роботу сторонніх сил з переміщення заряду, тоді як напруга характеризує роботу сил електричного поля. На затискачах ідеального джерела без струму напруга дорівнює ЕРС ($U = E$).

3. Закон Ома та електричний опір

Закон Ома є найважливішим законом електротехніки, який встановлює зв'язок між силою струму, напругою та опором в електричному колі. Німецький фізик Георг Симон Ом експериментально встановив цей закон у 1827 році.

3.1. Електричний опір та провідність

При русі вільних електронів у металевому провіднику вони постійно зіштовхуються з іонами кристалічної решітки, передаючи їм частину своєї кінетичної енергії. Ця взаємодія створює протидію руху електронів, яка називається **електричним опором R** . Опір вимірюється в омах (**Ом**). 1 Ом — це опір такого провідника, в якому при напрузі 1 В протікає струм 1 А.

Опір провідника залежить від його матеріалу, довжини l та площі поперечного перерізу S :

$$R = \rho \cdot (l / S)$$

де ρ — питомий електричний опір матеріалу провідника (**Ом·м** або **Ом·мм²/м**). Наприклад, для міді $\rho = 0.0175$ Ом·мм²/м, для алюмінію $\rho = 0.028$ Ом·мм²/м.

Величина, обернена до опору, називається **електричною провідністю G** :

$$G = 1 / R$$

Провідність вимірюється в сименсах (*См*).

3.1.1. Залежність опору від температури

Опір металевих провідників зростає з підвищенням температури. Ця залежність виражається формулою:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)]$$

де R_t — опір при температурі t ; R_0 — опір при початковій температурі t_0 (зазвичай 20°C); α — температурний коефіцієнт опору (для міді та алюмінію $\alpha \approx 0.004 \text{ K}^{-1}$). Цю властивість необхідно враховувати в прикладній механіці при проектуванні електродвигунів та силових трансформаторів, які можуть сильно нагріватися під час роботи, збільшуючи свій внутрішній опір.

3.2. Закон Ома для ділянки кола

Закон Ома для однорідної ділянки кола (яка не містить джерел ЕРС) формулюється так: сила струму на ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки і обернено пропорційна її опору.

$$I = U / R$$

Або через провідність: $I = U \cdot G$.

За допомогою цього закону можна визначити падіння напруги на будь-якому елементі верстатного обладнання: $U = I \cdot R$.

3.3. Закон Ома для повного кола

Повне (замкнене) електричне коло складається з джерела живлення (з ЕРС E та внутрішнім опором r_0) та зовнішнього кола (навантаження з опором R).

Струм у повному колі визначається формулою:

$$I = E / (R + r_0)$$

Це формулювання означає: **сила струму в замкненому колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела і обернено пропорційна повному опору кола.**

Повний опір складається з опору зовнішнього кола R та внутрішнього опору джерела r_0 . Падіння напруги в колі розподіляється так:

$$E = I \cdot R + I \cdot r_0 = U + U_0$$

де $U = I \cdot R$ — напруга на затискачах джерела (на зовнішньому опорі); $U_0 = I \cdot r_0$ — падіння напруги всередині джерела. Напруга на затискачах реального джерела завжди менша за його ЕРС на величину внутрішнього падіння напруги: $U = E - I \cdot r_0$.

3.3.1. Режими роботи електричного кола

1. **Режим холостого ходу (ХХ):** Зовнішнє коло розімкнене ($R \rightarrow \infty$). Струм у колі відсутній ($I = 0$). Напруга на затискачах джерела дорівнює його ЕРС ($U = E$).
2. **Режим короткого замикання (КЗ):** Опір зовнішнього кола дорівнює нулю ($R = 0$). Напруга на затискачах $U = 0$. Струм досягає свого максимального значення $I_{\text{кз}} = E / r_0$. Це аварійний режим, який може призвести до розплавлення проводів та пожежі. Для захисту від струмів КЗ в обладнанні встановлюють автоматичні вимикачі та запобіжники.
3. **Номінальний режим:** Режим, при якому обладнання працює з параметрами (напруга, струм, потужність), зазначеними в його паспорті заводом-виробником.

4. Робота та потужність постійного струму

Електричний струм, протікаючи по провіднику, виконує роботу. Робота електричного струму A на ділянці кола дорівнює добутку напруги U на кінцях цієї ділянки, сили струму I та часу його проходження t :

$$A = U \cdot I \cdot t$$

Одиницею вимірювання роботи є Джоуль (**Дж**). $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$. На практиці для вимірювання спожитої електроенергії частіше використовують позасистемну одиницю — кіловат-годину (**кВт·год**). $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Потужність електричного струму P — це робота, яка виконується за одиницю часу:

$$P = A / t = U \cdot I$$

Використовуючи закон Ома ($U = I \cdot R$ або $I = U / R$), формулу потужності можна записати у трьох видах:

$$P = U \cdot I = I^2 R = U^2 / R$$

Одиницею потужності є Ват (**Вт**). Для механічних розрахунків корисно пам'ятати, що 1 кінська сила (к.с.) ≈ 736 **Вт**.

4.1. Закон Джоуля-Ленца

При проходженні електричного струму по провіднику з опором **R** відбувається зіткнення рухомих електронів з атомами кристалічної решітки. Внаслідок цього кінетична енергія електронів перетворюється на теплову енергію.

Кількість теплоти **Q**, що виділяється у провіднику при проходженні по ньому електричного струму, прямо пропорційна квадрату сили струму **I**, опору провідника **R** і часу **t** проходження струму. Цей закон був відкритий незалежно англійським вченим Д. Джоулем та російським вченим Е. Ленцом:

$$Q = I^2 R t$$

Закон Джоуля-Ленца має величезне значення у прикладній механіці. З одного боку, на цьому законі ґрунтується робота електронагрівальних пристроїв, зварювальних апаратів, плавких запобіжників та теплових реле захисту. З іншого боку, виділення тепла обмежує пропускну здатність електричних кабелів та потужність електродвигунів. Перегрів ізоляції вище допустимих температур веде до її прискореного старіння або займання.

4.2. Баланс потужностей

Відповідно до закону збереження енергії, потужність, що віддається всіма джерелами електричної енергії в колі, повинна дорівнювати сумі потужностей, які споживаються всіма приймачами (включно з внутрішніми опорами самих джерел):

$$\Sigma P_{\text{джерел}} = \Sigma P_{\text{споживачів}}$$

При цьому добуток $E \cdot I$ береться зі знаком «плюс», якщо напрямки ЕРС E та струму I збігаються (джерело віддає енергію), і зі знаком «мінус», якщо вони протилежні (джерело працює в режимі споживача, наприклад, під час заряджання акумулятора).

5. Топологія електричних кіл. Закони Кірхгофа

Реальні електричні кола промислового обладнання є складними, розгалуженими системами. Для їх аналізу використовують поняття топології та закони Густава Роберта Кірхгофа (1847 р.).

5.1. Основні топологічні поняття

Для опису складних електричних кіл вводять наступні поняття:

- **Гілка (вітка)** — це ділянка електричного кола, через усі елементи якої протікає однаковий струм. Гілка може складатися з одного або кількох послідовно з'єднаних елементів.
- **Вузол** — це точка електричного кола, в якій збігаються (з'єднуються) не менше трьох гілок.
- **Контур** — це будь-який замкнений шлях, що проходить по гілках електричного кола. Контур називається *незалежним*, якщо він містить хоча б одну гілку, яка не входить до складу інших контурів.

5.2. Перший закон Кірхгофа (Закон струмів)

Перший закон Кірхгофа є наслідком закону збереження електричного заряду: в жодному вузлі електричного кола заряди не можуть накопичуватися.

Формулювання 1: Алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі електричного кола, дорівнює нулю.

$$\sum I_k = 0$$

Струмам, що входять у вузол, і струмам, що виходять з вузла, надають різні знаки. Наприклад, якщо струми, спрямовані до вузла, брати зі знаком «плюс», то струми, спрямовані від вузла, слід брати зі знаком «мінус».

Формулювання 2: Сума струмів, направлених до вузла, дорівнює сумі струмів, направлених від нього.

$$\sum I_{\text{вх}} = \sum I_{\text{вих}}$$

5.3. Другий закон Кірхгофа (Закон напруг)

Другий закон Кірхгофа випливає із закону збереження енергії та потенціального характеру електричного поля.

Формулювання: В будь-якому замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума електрорушійних сил (ЕРС) дорівнює алгебраїчній сумі падінь напруг на всіх резистивних елементах цього контуру.

$$\sum E_i = \sum I_k R_k$$

Правило знаків для складання рівнянь за другим законом Кірхгофа:

1. Довільно обирають позитивний напрямок обходу контуру (наприклад, за годинниковою стрілкою).
2. Довільно обирають умовні позитивні напрямки струмів у всіх гілках.
3. ЕРС беруться зі знаком «плюс», якщо їхній напрямок збігається з напрямком обходу контуру. У протилежному випадку — зі знаком «мінус».
4. Падіння напруги $I \cdot R$ беруться зі знаком «плюс», якщо напрямок струму в даній гілці збігається з напрямком обходу контуру. У протилежному випадку — зі знаком «мінус».

Для повного розрахунку складного кола за законами Кірхгофа необхідно скласти систему рівнянь. Якщо коло містить Y вузлів і Γ гілок, то:

- за першим законом Кірхгофа складають $(Y - 1)$ незалежних рівнянь;
- за другим законом Кірхгофа складають $\Gamma - (Y - 1)$ рівнянь. Загальна кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих струмів (кількості гілок Γ).

6. З'єднання елементів електричного кола

В електричних схемах верстатів деталі можуть бути з'єднані послідовно, паралельно або утворювати змішане з'єднання. Окрім того, складні кола можуть містити з'єднання зіркою або трикутником. Щоб спростити аналіз, такі схеми зводять до одного еквівалентного опору.

6.1. Послідовне з'єднання

При послідовному з'єднанні кінець одного елемента з'єднується з початком наступного. Через усі елементи протікає однаковий струм I .

Еквівалентний опір кола при послідовному з'єднанні дорівнює сумі опорів окремих елементів:

$$R_{\text{екв}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \Sigma R_i$$

Властивість: напруги на елементах розподіляються прямо пропорційно їхнім опорам. Це принцип роботи *дільника напруги*.

6.2. Паралельне з'єднання

При паралельному з'єднанні всі елементи приєднані до двох спільних вузлів. Напруга U на всіх паралельних гілках однакова. Струм у нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів в окремих гілках (за I законом Кірхгофа).

Еквівалентна провідність кола дорівнює сумі провідностей окремих гілок:

$$G_{\text{екв}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

Для двох паралельно з'єднаних резисторів еквівалентний опір дорівнює добутку опорів, поділеному на їх суму:

$$R_{\text{екв}} = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$$

Струми в гілках розподіляються обернено пропорційно їхнім опорам. Це принцип роботи *дільника струму* (шунта).

6.3. Перетворення зірки опорів у трикутник та навпаки

Часто зустрічаються кола, які не можна звести до послідовних або паралельних шляхом простих перетворень (наприклад, мостові схеми). В таких випадках застосовують перетворення з'єднання типу "зірка" в еквівалентний "трикутник", або навпаки.

Перетворення зірки (R_1, R_2, R_3) в еквівалентний трикутник (R_{12}, R_{23}, R_{31}): Опір сторони еквівалентного трикутника дорівнює сумі двох променів зірки, приєднаних до тих самих вузлів, плюс їх добуток, поділений на третій промінь.

$$R_{12} = R_1 + R_2 + (R_1 R_2) / R_3$$

Перетворення трикутника (R_{12}, R_{23}, R_{31}) в еквівалентну зірку (R_1, R_2, R_3): Опір променя еквівалентної зірки дорівнює добутку опорів двох сторін трикутника, приєднаних до того ж вузла, поділеному на суму всіх трьох сторін трикутника.

$$R_1 = (R_{12} R_{31}) / (R_{12} + R_{23} + R_{31})$$

Ці перетворення дозволяють будь-яку складну пасивну мостову схему перетворити на просте послідовно-паралельне коло.

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення електричного поля та його напруженості.
2. Що таке електричний потенціал та напруга? У яких одиницях вони вимірюються?
3. Назвіть умови, необхідні для існування електричного струму.
4. Що таке електрорушійна сила (ЕРС) і чим вона відрізняється від напруги?
5. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
6. Від чого залежить електричний опір металевого провідника?
7. Запишіть формулу закону Ома для повного кола та поясніть її складові.
8. У чому суть режимів холостого ходу та короткого замикання?
9. Сформулюйте закон Джоуля-Ленца. Яке його практичне значення для верстатного обладнання?
10. Дайте визначення понять "вузол", "гілка", "контур" електричного кола.
11. Сформулюйте перший і другий закони Кірхгофа.
12. Як визначається еквівалентний опір кола при послідовному та паралельному з'єднанні споживачів?
13. Для чого застосовують еквівалентні перетворення "зірка - трикутник"?



**ДНІПРОВСЬКИЙ
ПРОФЕСІЙНИЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
КОЛЕДЖ**

ЗАКЛАД ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ

Документ містить ознайомчий фрагмент.

**Повна версія доступна в електронній
бібліотеці закладу після входу в особистий
кабінет студента.**